

高场核磁共振波谱仪前置放大器的研制

包长虹

指导教师 陈忠 教授
孙惠军 高级工程师

厦门大学

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 19820081153044

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

高场核磁共振波谱仪前置放大器的研制

Design of Preamplifiers for High-field Nuclear Magnetic
Resonance Spectrometers

包 长 虹

指导教师姓名: 陈 忠 教 授

孙惠军 高级工程师

专 业 名 称: 电磁场与微波技术

论文提交日期: 2 0 1 1 年 月

论文答辩时间: 2 0 1 1 年 月

学位授予日期: 2 0 1 1 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2011 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

前置放大器位于核磁共振波谱仪射频接收系统的最前端，是最重要的部件之一。前置放大器主要实现小信号放大和发射/接收切换功能，其噪声特性直接影响着谱仪的灵敏度，发射/接收切换速度是谱仪的一项重要指标要求。另一方面前置放大器从探头所感应到的自由感应衰减(FID)信号非常微弱，只有 μV 级，因此对前置放大器的噪声特性、功率增益和工作频率范围等性能具有很高的要求。

本文从谱仪对前置放大器的各种性能要求出发，结合射频电路设计理论，设计并实现了双通道高场核磁共振波谱仪前置放大器，即 $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ 通道的高带前置放大器和 X 核通道的宽带前置放大器。所研制的高带前置放大器工作频率为 450MHz~550MHz，通过改变电容电感的参数可将设计扩展到其他规格高场谱仪的工作频率范围。宽带前置放大器工作频率为 15MHz~300MHz。

本文详细描述了前置放大器的具体设计过程、性能调试流程以及 NMR 谱仪实验结果。根据射频电路设计理论及任务书指标要求，将前置放大器分为小信号电路、大信号电路和工作状态检测电路三个模块分别进行设计，利用射频电路设计和仿真软件 ADS 对电路进行仿真和 PCB 版图设计。调试过程中先调试各个模块，根据调试结果利用 ADS 软件进行优化分析，得到最终整体的前置放大器。

对所研制的前放进行性能测试并利用其进行核磁共振实验，测试及实验结果显示前放的各项性能指标符合设计要求，具有增益高、噪声系数低、带内平坦度高、线性特性好和工作状态检测电路准确简洁的特点。

关键词：核磁共振波谱仪 前置放大器 高磁场 低噪声

Abstract

Preamplifiers that situate at radio frequency (RF) reception system front-end are the most important parts of nuclear magnetic resonance (NMR) spectrometers. Preamplifier functions as amplifier for small signal and switch for transmitting and receiving condition, so the switching time is a crucial index. Input signal detected by preamplifiers is small very much, whose order of magnitude is μV , as a result, preamplifiers must have excellent noise character to ensure NMR spectrometer's resolution, as well as high power gain, correct working frequency.

On the basis of RF circuit theory and the overall parameter requirements, dual channel preamplifiers for high field NMR spectrometer were designed, which are high-band (HB) preamplifier for $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ channel and broad-band (BB) preamplifier for X nuclear channel. The designed HB preamplifier works at 450MHz~550MHz, which can also be applied to other high-field NMR spectrometers, though changing capacity and inductance value. The designed BB preamplifier works at 15MHz~300MHz for detecting ^{13}C 、 ^{31}P and other low nature abundance nuclease.

This paper particularly describes preamplifiers' specific designing and debugging process. On the basis of RF circuit theory and the overall parameter requirements, preamplifiers are segmented into small signal circuits、large signal circuits and working condition detection circuit, utilizing RF circuits design and simulation software ADS to simulate and design PCB. Every circuit is respectively debugged, and results can be used to optimize preamplifiers. Different circuit was debugged respectively to acquire their performance test results. According to the results, preamplifiers can be analyzed and optimized continually utilizing ADS software. Finally, performance test and NMR experiment results are given.

Performance test and NMR experiment results demonstrated that preamplifiers had good performance, as illustrated by its large gain, low noise figure, small

in-band fluctuation, great linear characteristic, as well as an accuracy of working condition detection circuit.

Key words: NMR spectrometer; preamplifier; high magnetic field; low-noise

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第一章 引言	1
1.1 课题研究背景、目的与意义	1
1.2 核磁共振波谱仪原理及结构简述	1
1.3 国内外核磁共振波谱仪发展概况	3
1.4 论文研究的主要内容	4
第二章 核磁共振波谱仪前置放大器设计理论	6
2.1 前置放大器设计理论	6
2.2 电磁兼容理论	7
2.3 高速电路信号完整性与 PCB 设计	9
2.4 电流检测技术	13
2.5 射频设计理论	15
2.6 射频设计仿真软件 ADS 简介	25
第三章 核磁共振谱仪 $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ 通道高带前置放大器的设计与仿真	27
3.1 高带前置放大器结构设计	27
3.2 $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ 核通道高带前置放大器任务书指标	28
3.3 高带前置放大器子模块设计与仿真	29
3.4 工作状态检测电路	35
3.5 高带前置放大器整体仿真结果	37
第四章 核磁共振谱仪 X 核通道宽带前置放大器的设计与仿真	39
4.1 宽带前置放大器结构设计	39
4.2 X 核通道宽带前置放大器任务书指标	39
4.3 宽带前置放大器子模块设计与仿真	40

4.4 宽带前置放大器整体仿真结果	44
第五章 核磁共振波谱仪前置放大器 PCB 设计与测试结果	47
5.1 前置放大器的 PCB 工艺设计	47
5.2 测试平台及方法	47
5.3 高带前置放大器测试结果	48
5.4 宽带前置放大器测试结果	55
第六章 总结与展望	63
参 考 文 献	65
攻读硕士学位期间科研成果	69
致 谢	70

Table of Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	II
Chapter1 Introduction.....	1
1.1 Background, target and significance of project	1
1.2 Theory and structure of NMR spectrometer.....	1
1.3 Development of NMR spectrometer at home and abroad.....	3
1.4 Primary coverage of this paper	4
Chapter2 NMR spectrometer design theory.....	6
2.1 Preamplifier design theory	6
2.2 EMC theory	7
2.3 High speed circuit signal integrity and PCB design.....	9
2.4 Current sensing technology	13
2.5 RF design theory	15
2.6 Introduction of RF design and simulation software ADS.....	25
Chapter3 HB preamplifier design and simulation.....	27
3.1 HB preamplifier structure design.....	27
3.2 HB preamplifier worksheets indicators	28
3.3 Sub-circuits design and simulation of HB preamplifier	29
3.4 Working condition detecting circuit.....	35
3.5 HB preamplifier overall simulation results	37
Chapter4 BB preamplifier design and simulation	39
4.1 BB preamplifier structure design	39
4.2 BB preamplifier worksheets indicators.....	39
4.3 Sub-circuits design and simulation of BB preamplifier	40
4.4 BB preamplifier overall simulation results.....	44
Chapter5 PCB design and test results.....	47
5.1 PCB technics design of Preamplifiers	47
5.2 Test instruments and methods	47
5.3 Test results of HB preamplifiers	48
5.4 Test results of BB preamplifiers.....	55

Chapter6 Conclusion and prospect	63
References	65
Publications	69
Acknowledgements	70

厦门大学博士论文摘要库

第一章 引言

1.1 课题研究背景、目的与意义

高场核磁共振波谱仪前置放大器的研制工作属于“十一五”国家科技支撑计划课题——“300MHz~500MHz 核磁共振波谱仪的研制”任务之一。该任务由厦门大学陈忠教授领导的课题组承担。本论文的研究工作以此课题为背景，在2007~2009 三年时间内完成了具有自主知识产权的高场核磁共振波谱仪高带前置放大器和宽带前置放大器。所完成的工作不仅按要求满足了任务需求，而且为我国自主研制核磁共振波谱仪和相应的产业化做出了应有的贡献，具有重要意义。

1.2 核磁共振波谱仪原理及结构简述

核磁共振（简称 NMR）是指处在某个静磁场中的物质的原子核系统受到相应频率电磁波作用时，在他们磁能级之间发生的共振跃迁现象^[1]。这项技术是 1945 年发展起来的^[2]，是低能量电磁波即无线电波与物质相互作用的一种物理现象^[3]，很快成为物理、化学、生物、医学、地学等学科领域中不可或缺的科研工具，对于科学研究和人类生活及社会发展都产生了深远的影响。

核磁共振条件 $\omega = \gamma \cdot H_0$ ，其中 ω 为激发原子核发生共振现象的射频频率， γ 为原子核的磁旋比， H_0 为静磁场强度。当三者间的关系满足核磁共振的条件时，将发生核磁共振现象，利用谱仪中的信号检测部件检测并接收信号，然后再利用控制和显示部分将信号转化成核磁共振谱图，通过对图像的分析研究进而得到检测样品的组成成分。

脉冲傅里叶变换核磁共振波谱仪主要由磁体、脉冲程序器、频率合成器、射频系统、探头、接收系统、场-频联锁系统^[4]、控制系统及计算机等部分组成，如图 1-1 所示，具体介绍如下：

1. 脉冲程序器控制接收门、发射门、相敏检波器的参考门等门电路分时作用，以控制谱仪工作在相应的状态。
2. 频率合成器用于将振荡器产生的频率信号合成其他系统工作时所需要的频率信号。
3. 射频系统主要由射频振荡器、发射门、功率放大器三部分组成，主要作用是产生连续而稳定的高功率射频信号激发样品。功率放大器也被称作射频发射机，与探头中的样品线圈连接在一起。
4. 接收系统包括前置放大器、控制接收机打开的接收门、混频器、中频放大器、检波器、低频放大器和滤波器等部件。用来放大探头所接收到的 FID 信号，滤除噪声等干扰。
5. 场-频连锁系统来提高磁场的稳定性，防止磁体内的磁场随外部环境的变化而产生漂移。
6. 控制系统用来完成数据取样、累加、傅里叶变换（FT）和数据处理等工作，包括有 A/D 转换器、DSP 等。
7. 计算机则用于控制各种命令操作、傅里叶计算以及显示结果。

除去以上系统外，谱仪还包括变温系统、气动系统和梯度场^[5]等。NMR 谱仪工作的基本原理为：脉冲程序器控制发射门和接收门分时打开，当发射门打开时接收门关闭，射频振荡器产生的射频信号通过功率放大器放大后激发探头，发生核磁共振现象。此时脉冲程序器控制发射门关闭，接收门打开，探头检测到的 FID 信号通过接收系统后进入控制系统，在那里将经过一系列的计算，最终得到核磁共振谱，各种计算和处理指令通过计算机发出。频率合成器合成场-频连锁系统所需要的各种频率信号，在实验时要首先利用场-频连锁系统稳定磁场^[6]。FID 信号是时域信号，需要经过傅里叶变换才能够转换成频域信号，即核磁共振信号。

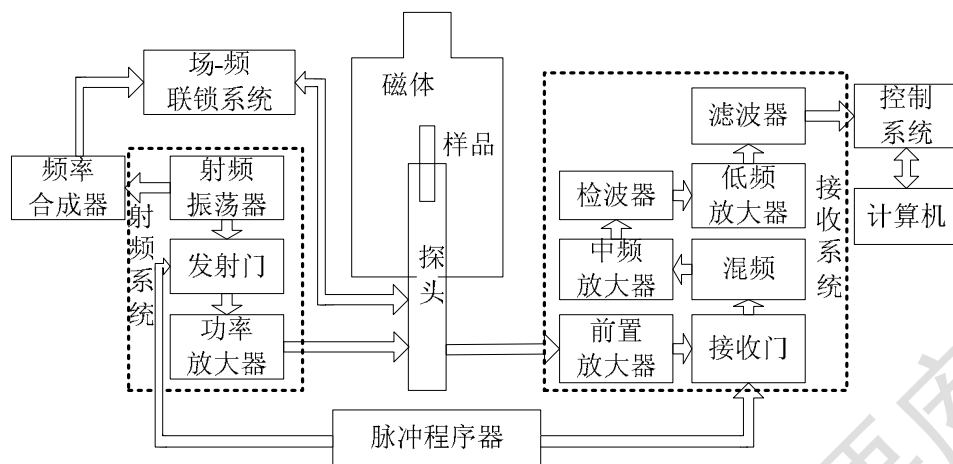


图 1-1 核磁共振谱仪总体结构框图

灵敏度是用来衡量谱仪检测 FID 信号能力的一项指标，一般用标准样品在谱仪上测到的 NMR 信号的信噪比来定义。谱仪的灵敏度和被检测核的磁旋比、静磁场强度、样品体积、线圈体积、谐振回路品质因数、绝对温度、接收机噪声因子以及接收机带宽有关，频率较低时主要与核的磁旋比和静磁场强度有关。核的自然丰度越高，静磁场越强信噪比就越大，则谱仪的灵敏度越高。

1.3 国内外核磁共振波谱仪发展概况

核磁共振现象于 1946 年由波塞尔(Purcell E.M.)和布洛赫(Block F.)所领导的两个小组几乎于同一时间用不同的方法发现^[8]，最初主要用于核物理中研究原子的核磁矩。而第一台核磁共振波谱仪则是在 1953 年进入了应用阶段^[8]，工作频率是 30~40MHz，磁场强度是 5000~7000Gs，磁场均匀度是 1×10^{-7} 。1958 年制造出了 60MHz 的波谱仪磁场强度是 14092Gs，到了 1962 年就生产出了 100MHz 高分辨核磁共振波谱仪，磁场达 23500Gs，磁场均匀度是 1×10^{-8} ，信噪比大都在 10:1 之内，随后 200MHz 左右的波谱仪问世^[9]。70 年代初，已经能够生产出 360MHz 的波谱仪了，90 年代 400MHz、600MHz 的谱仪也成功产出，目前市场上已经出现了 900MHz 以上的波谱仪。

核磁共振波谱仪向着高场发展，既能大大提高谱图的信噪比，又能解决生物大分子信号重叠的问题^[10]。现代核磁共振谱仪发展了多通道、多维技术，在科学研究中发挥了更多的作用，并且使其与以太网相连接，方便进行数据传输，

各个厂商还设计出了易于操作使用的软件平台，各种带有新技术的探头层出不穷^[11, 12]。

目前我国尚未有商品化的自主高场核磁共振波谱仪，该类设备完全依赖进口。核磁共振波谱仪作为检测物质结构的基本工具之一，已广泛的应用于化学、材料科学、生命科学以及医药等领域。随着我国经济实力的不断增强，相关产业对核磁共振波谱仪的需求越来越多，因此研发具有自主知识产权的现代高场高分辨率的核磁共振谱仪具有重大的意义。

1.4 论文研究的主要内容

本论文主要研制高场了核磁共振波谱仪接收系统中的前置放大器，与上述前置放大器不同的是本文中的前放是将低噪声放大电路同发射/接收射频开关集成在同一部件中。如图 1-2 所示，当脉冲程序器控制射频开关打开时，大功率的射频脉冲通过射频开关激发探头，此时保护电路间具有非常高的隔离度，阻止大功率脉冲进入低噪声放大电路；当射频开关关闭时，探头接收到的 FID 信号通过保护电路进入低噪声放大电路，然后进入下一级的混频器，低噪声放大电路前端设计的保护电路滤除了 FID 信号中掺杂的噪声，保证频率范围的信号通过。另外，在射频开关打开时，保护电路具有很高的隔离度，阻止大功率的射频信号进入放大电路并对其造成损坏。

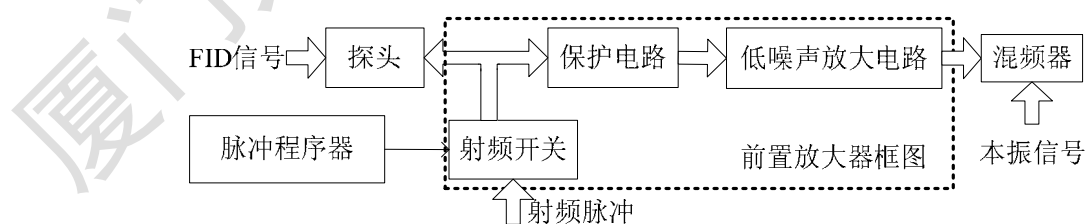


图 1-2 前置放大器系统框图

根据核磁共振实验中不同原子核共振频率的不同，需要设计工作在不同频率范围的前置放大器。本文研制了用于观察 $^1\text{H}/^{19}\text{F}$ 核的高带(High-band, HB)前置放大器和用于观察 X 核通道的宽带(Broad-band, BB)前置放大器，并将在下面

的章节中详细的介绍这两种前放的设计过程，主要内容有：

第一章为引言，主要是介绍本课题的研究背景、课题来源、任务和目的，简述了 NMR 现象基本理论、NMR 谱仪的功能结构和工作的基本原理，分析了当前国内外核磁共振发展的概况，并概述了本文所研究的前置放大器的结构及功能。

第二章主要是介绍了本文在研究过程中所应用到的理论知识，如前置放大器设计理论、电磁兼容理论、电流检测技术以及一些射频电路的设计理论等，其中着重介绍了小信号射频放大器设计理论、计算机辅助设计工具、微波晶体管特性及种类和宽带放大器设计的难点及解决方法。

第三章详细介绍了高带前放各个模块的设计方法，并给出了利用射频设计仿真软件 ADS 对各模块电路进行仿真的结果，最后给出了高带前放整体的仿真结果。

第四章详细介绍了宽带前放各个模块的设计方法，并给出了利用 ADS 软件对各模块电路进行仿真的结果，最后给出了宽带前放整体的仿真结果以及对其电磁兼容性的分析及解决方法。

第五章介绍了两种前放印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)的设计和各種性能测试平台，并给出了性能测试结果，包括 S 参数、噪声特性、线性特性以及过载保护时间等测试结果，还给出了利用本文所设计的前放进行 NMR 实验所获得的 NMR 信号的灵敏度并与现代商用谱仪前放的实验结果进行了比较。

第六章对本文所做的工作进行了概要和总结，并针对可以进一步加强和完善的地方进行了展望。

第二章 核磁共振波谱仪前置放大器设计理论

2.1 前置放大器设计理论

前置放大器是微弱信号检测系统中不可缺少的部件，位于信号源与放大器之间，能把极其微弱的电信号放大到检测设备可以采集到的电信号，广泛应用于通讯、军工、生物医学仪器和地质勘探仪器等各种测量接收仪器中^[13]。其噪声系数决定了整个系统的噪声特性，因为后级放大器会进一步放大它所产生的噪声，根据噪声匹配原则，前置放大器的最佳源电阻等于信号源输出电阻的情况下，才能使电路的噪声系数最小，在中频段及以下，可以忽略信号源的电抗，放大器的最佳源电阻及最小噪声系数分别为^[14]：

$$R_{so} = e_N / i_N \quad (2.1)$$

$$F_{\min} = 1 + \frac{e_N i_N}{2kT} \quad (2.2)$$

式中 k 为波尔兹曼常数， T 为绝对温度， e_N 和 i_N 分别为放大器的等效输入电压噪声和等效输入电流噪声的平方根谱密度，式 2.1 和式 2.2 即为设计中频段低噪声前置放大器有源器件选择的依据。在高频情况下，信号源的电抗不容忽视，晶体管的极间电容和引线的分布电容会导致各噪声源之间相互耦合，因此 e_N 和 i_N 之间就会相关，相关系数为 ρ ，此时放大器的最佳源电阻和最小噪声系数分别为：

$$R_{so} = \sqrt{1 - \rho_2^2} \cdot \frac{e_N}{i_N} \quad (2.3)$$

$$F_{\min} = 1 + \frac{(\sqrt{1 - \rho_2^2} + \rho_1) e_N i_N}{2kT} \quad (2.4)$$

式中 ρ_1 和 ρ_2 分别为 ρ 的实部和虚部，当放大器的工作频率不是很高时，放大器的噪声相关系数可以忽略，即 $\rho_1 = \rho_2 = 0$ ，则式 2.3 和式 2.4 可以分别简化成式 2.1 和式 2.2。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库